

# ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОЙ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 40ХГНМ

*Дедюлина О.К.*

*Руководитель – д.т.н., проф. Салищев Г.А.*

*БелГУ, г. Белгород*

Развитие индустрии предъявляет все более высокие требования к характеристикам материалов, которые используются для изготовления деталей и конструкций, работающих в напряженных условиях. В качестве способа улучшения их механических свойств в последние годы особое внимание уделяется получению ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, так как она обладает уникальным сочетанием прочностных характеристик и пластичности.

Одним из способов пластической деформации используемых, в частности в автомобильной промышленности, является ротационная ковка. Деформация в данном случае осуществляется мелкими шагами, что позволяет получать более однородную структуру по всему объему заготовки по сравнению с непрерывными способами обработки.

Целью данной работы являлось исследование влияния ротационной ковки на структуру и механические свойства среднеуглеродистой низколегированной стали марки 40ХГНМ. Для этого прутки в исходном состоянии были подвергнут закалке с температуры 840°C. Далее заготовка была подвергнута ротационной ковке в несколько этапов по следующей схеме: деформация при температуре 600°C до  $\varepsilon \sim 1,2$ ; затем заготовку разрезали на две части, одна из которых деформировалась при 600°C, а другая при 500°C до  $\varepsilon \sim 2,2$ ; далее деформация проводилась также при 600°C и 500°C до  $\varepsilon \sim 2,9$ . Охлаждение после каждого этапа ковки проводили на воздухе до комнатной температуры. Исследование микроструктуры проводили в режиме дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) на FEI Quanta 600 FEG. Образцы для механических испытаний вырезали из центральной части прутков в продольном направлении.

Вследствие нагрева под деформацию до 600°C исходной структурой для ротационной ковки являлся сорбит отпуска. Для всех режимов деформации характерно наличие вытянутых в продольном направлении ферритных зерен (длина которых в некоторых случаях превышает 10 мкм), образование которых присуще данному методу обработки (рис. 1). По результатам исследования микроструктуры стали 40ХГНМ после различных режимов ротационной ковки можно увидеть, что увеличение степени деформации ведет к уменьшению размера ферритного зерна,

причем наиболее заметному при снижении температурыковки до 500°C (таб. 1).

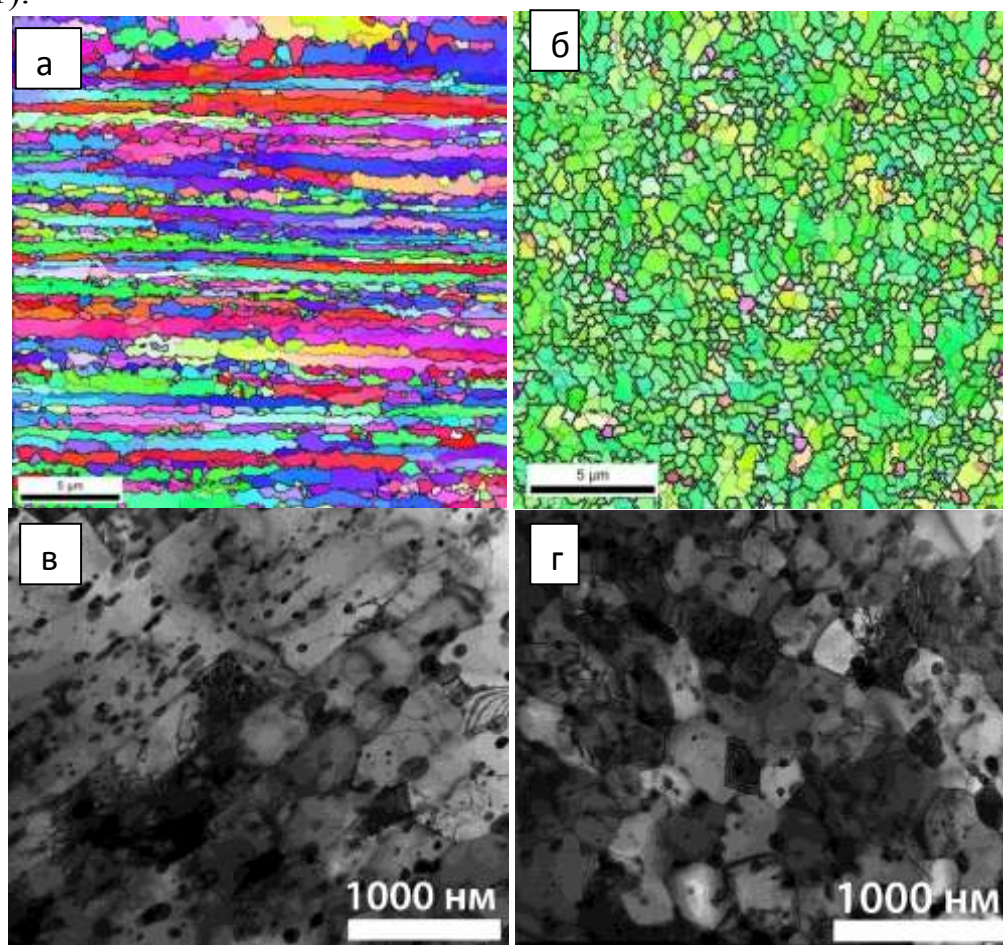


Рис. 1. Микроструктура стали 40ХГНМ после ротационнойковки  $\varepsilon \sim 2,9$  при  $T=500^{\circ}\text{C}$  в продольном (а, в) и поперечном (б, г) сечении

В тоже время при увеличении степени деформации до  $\varepsilon \sim 2,9$  при обеих температурах средний размер зерен/субзерен несколько увеличивается, растет доля большеугловых границ, а также отчетливо наблюдаются признаки рекристаллизации - образование равноосных зерен практически свободных от дислокаций.

Результаты механических испытаний образцов представлены в таблице 2. Видно, что формирование УМЗ структуры уже после минимальной деформации  $\varepsilon \sim 1,2$  приводит к значительному росту прочностных характеристик по сравнению с образцом после закалки и высокого отпуска. Однако увеличение истинной степени деформации до  $\varepsilon \sim 2,9$  при обеих температурах отражается в значительном падении прочности и росте пластичности на 2-4,5%. Данный эффект, очевидно, связан с ростом совершенства структуры и увеличения доли ВУГ.

Таблица 1. Параметры микроструктуры стали 40ХГНМ после различных режимов ротационнойковки

Режим ротационнойковки	$d_{\text{зерна, нм}}$	$d_{\text{зерна+субзерна, нм}}$	доля БУГ, %	доля МУГ, %	$d_{\text{карбиды, нм}}$
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 1,2$	705	410	52,1	47,9	45
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 1,2 \rightarrow T=500^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,2$	705	380	45,9	54,1	50
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,2$	590	365	58,3	41,7	55
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 1,2 \rightarrow T=500^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,9$	500	400	71,3	28,7	55
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,9$	580	460	74,7	25,3	75

Таблица 2. Механические свойства стали 40ХГНМ после различных этапов ротационнойковки

Режим ротационнойковки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	KV, Дж
Закалка $840^{\circ}\text{C}$ , отпуск $600^{\circ}\text{C}$ 1ч	840	980	15,0	57
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 1,2$	980	1020	17,7	143
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 1,2 \rightarrow T=500^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,2$	1090	1100	16,7	158
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,2$	1030	1060	16,1	212
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 1,2 \rightarrow T=500^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,9$	960	1000	19,4	235
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,9$	830	900	22,3	223

Работа удара образцов после ротационнойковки увеличилась в 3-4 раза при комнатной и до 10 раз при пониженных температурах по сравнению с образцами после закалки и отпуска (таб. 3). Данный эффект является следствием того, что образцы после ротационнойковки показали расслоение, т.е. трещины “ветвились” по телу вытянутых вдоль оси деформации ферритных зерен с дисперсно распределенными наноразмерными карбидами.

Таблица 3. Влияние режимов ротационнойковки на работу удара в области низких температур

Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	+20	-20	-40	-65	-100
Режим ротационнойковки	Работа удара, Дж				
Закалка $840^{\circ}\text{C}$ , отпуск $600^{\circ}\text{C}$ 1ч	57	37	30	26	18
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 1,2$	212	219	198	267	183
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 1,2 \rightarrow T=500^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,2$	223	258	270	217	261
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,2$	158	146	169	206	122
$T=600^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 1,2 \rightarrow T=500^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon \sim 2,9$	235	278	202	280	291